

# Johannes Fürst

## Abstract

The present Greenland ice sheet stores a freshwater volume equivalent to more than 7 m of global mean sea-level rise, if it were to melt. Since the middle of the 1990s, ice loss is observed and loss rates have increased up to this day. This trend raises concerns about a continued intensification in the future. The mass budget of the ice sheet is determined by the surface mass balance and by the ice discharge to the surrounding ocean at the marine margins. Changes in both components cause a comparable share of the current increase in ice loss. Projections of the future ice volume evolution must, therefore, account for changes in both surface mass balance and ice discharge. Yet the multitude of small-scale processes controlling the ice-dynamic response at the marine ice fronts hamper model approaches appropriate to constrain future changes in ice discharge over the entire ice sheet. Observations indicate that major accelerations of the marine-terminated outlet glaciers coincide with periods when warm water masses reached the Greenland coast.

In this thesis, an existing Greenland ice sheet model is dynamically refined and further extended to account for the effect of regional variations in ocean temperatures on ice discharge. The suggested parameterisation serves for future ice volume projections of the Greenland ice sheet and accounts for changes in ice discharge and in surface mass balance in response to oceanic and atmospheric warming.

The ice flow component of the Greenland ice sheet model is improved such that it allows a more complete description of the force balance within the ice body, i.e. a higher-order or more precisely a multilayer longitudinal stresses approach. A new discretization scheme for the solved higher-order equations is suggested that is beneficial to the convergence behaviour of the underlying solver and to the computational efficiency. This improvement forms the centrepiece of the presented work and ensures the feasibility of the centennial ice volume projections with the new dynamically more complete ice flow model.

The new ice-dynamic model component allows for direct horizontal flow coupling, a mechanism that is particularly important for channelised outlet glacier flow near the marine ice sheet margins. This mechanism was hypothesised to facilitate ice sheet disintegration by fast inland propagation of margin perturbations. Direct horizontal coupling is indeed found to allow for faster readjustment of the inland ice flow but it causes a reduction of the centennial ice loss in response to prescribed, coupling-independent margin perturbations. Yet, the net effect on the total volume evolution is minor when accounting for direct horizontal coupling. But directly at the marine ice fronts, this flow coupling determines the ice discharge. Hence, projections of the Greenland ice volume require the more complete ice-flow model component.

For projecting the future evolution of the Greenland ice sheet, climate conditions are applied from an ensemble of climate models driven by a wide range of climate scenarios. The increase in Greenland air temperatures in the ensemble reaches up to 11°C within the coming century while offshore ocean warming at intermediate depth remains below 5°C. By 2100, all projections show regional warming in the ocean and the atmosphere, causing ice loss on Greenland. The sea-level contribution from the ice sheet reaches a centennial maximum of 16.6 cm for the high-emission scenario. For the low impact scenario, for which the warming trajectory peaks already within this century, a minimum centennial ice loss of 1.4 cm is attainable. The ensemble average ice loss for the high and low-impact scenarios is equivalent to respectively 10.2 and 4.5 cm of global sea level. On the long run, only the low-impact scenario causes a volume trajectory with declining loss rates by 2300. Such a decline is necessary if the aim is to preserve a future Greenland ice sheet with comparable size than at present. For a more moderate mitigation scenario, the centennial ensemble ice loss is 5.5 cm and loss rates remain virtually constant thereafter even though the warming trend already abates. By 2300, ice equivalent to 20.1 cm is lost on average and it remains uncertain if the ice sheet is sustainable even for the moderate, global warming of 2.2°C in this scenario.

Though the increase in ice discharge over the last decade explains about half of the inferred total ice loss increase, which is reproduced by the ice-sheet model, the relative importance of future changes in ice discharge ultimately decreases. The decreasing importance for total mass loss mainly arises from the dominant increase in surface melting under future warming. But ice discharge is further limited by thinning and retreat of the ice sheet margin. The different balance of processes causing ice loss in the future implies that the inferred mass loss record over the last few decades should not serve as sole basis for extrapolation.

# Samenvatting

In zijn huidige vorm herbergt de Groenlandse ijskap een zoetwatervolume dat bij een totaal afsmelten zou leiden tot een wereldwijde zeespiegelstijging van meer dan 7 meter. Waarnemingen wijzen op een steeds groter wordend jaarlijks verlies van ijsvolume sinds het midden van de jaren '90. Deze trend leidt tot ongerustheid over een toekomstige verscherping van het massaverlies. De massabalans van de ijskap wordt bepaald door twee factoren: enerzijds door de massabalans aan de oppervlakte, met name het verschil tussen accumulatie en ablatie, en anderzijds door de ijsafvoer aan de mariene rand van de ijskap, voornamelijk door het afkalven van ijsbergen in zogenaamde outlet gletsjers. Gedurende de laatste twee decennia hebben veranderingen in deze beide componenten ongeveer in gelijke mate bijgedragen tot het toenemende ijsverlies. Prognoses omtrent de toekomstige evolutie van het ijsverlies op Groenland moeten dan ook rekening houden met de verandering van deze twee componenten. Een modelbenadering op ijskapschaal om de toekomstige evolutie van de ijsafvoer te modelleren wordt echter bemoeilijkt door het veelvoud aan kleinschalige processen die de ijsdynamica aan de mariene ijskaprand controleren. Observaties tonen aan dat dynamische versnellingen van outlet gletsjers gepaard gaan met periodes waarin warmere watermassa's de Groenlandse kust bereikten.

In deze thesis wordt een reeds bestaand ijskapmodel voor Groenland verder ontwikkeld, waarbij de nadruk voornamelijk ligt op de ijsdynamische component. Bovendien wordt een parameterisatie voorgesteld die de invloed van veranderingen in oceaantemperatuur op de ijsafvoer bepaalt. Deze parameterisatie wordt vervolgens gebruikt om de toekomstige evolutie in de Groenlandse ijskap, die wordt bepaald door veranderingen in ijsafvoer alsook in de oppervlaktmassabalans, te simuleren.

De ijsdynamische component van het Groenlandse ijskapmodel werd verbeterd zodat het een vollediger beschrijving van het evenwicht tussen de interne krachten toelaat. Concreet houdt de nieuwe benadering van het evenwicht nu ook rekening met verticale verschillen in de longitudinale spanningsvelden in het ijs. Voor het stelsel van vergelijkingen werd een nieuwe discretisatie gebruikt, wat zowel het convergentiegedrag van de numerieke oplossingsprocedure als de efficiëntie van het programma verbetert. Het nieuwe model laat een meer realistische beschrijving van de ijsvloei in outlet gletsjers toe en de numerieke verbetering stelt ons in staat om simulaties voor de Groenlandse ijskap op 100-jarige tijdschaal uit te voeren.

De nieuwe ijsdynamische modelcomponent houdt bovendien rekening met eenrechtstreekse, horizontale koppeling van de ijsvloei. Dit mechanisme is van groot belang voor het ijstransport in outlet gletsjers nabij de mariene randen van de ijskap. Er wordt verondersteld dat dit mechanisme de desintegratie van de ijskap ondersteunt door een mogelijk snelle landinwaartse verspreiding van marginale verstoringen. Deze horizontale koppeling vereenvoudigt inderdaad de binnenlandse aanpassing van de ijsvloei en de ijsgeometrie, maar vermindert

wel het ijsverlies veroorzaakt door koppelings-onafhankelijke perturbaties aan de rand van de ijskap. Het netto-effect van de ijsvloei-koppeling op de evolutie van het ijsvolume is desondanks gering. Aan de mariene ijsfronten is de horizontale koppeling nochtans van groot belang omdat deze de ijsafvoer bepaalt, wat op zijn beurt cruciaal is voor toekomstige projecties van het ijsvolume.

Om de toekomstige evolutie van de ijskap te bepalen, worden de klimatologische omstandigheden voorgeschreven aan de hand van een spectrum aan klimaatmodellen die worden aangedreven door meerdere klimaatscenario's. In het meest extreme scenario neemt de luchttemperatuur over Groenland toe met 11°C gedurende de 21ste eeuw, terwijl de omliggende oceaan maximaal 5°C opwarmt op middelmatige diepte. Tegen 2100 vindt er in alle klimaatprojecties een regionale opwarming van de oceaan en van de atmosfeer plaats, wat leidt tot een verlies aan landijs. De zeespiegelstijging bereikt, door het smelten van de ijskap voor het hoogste emissiescenario, een maximale waarde van 16,6 cm over een periode van 100 jaar. Bij het lage impactscenario piekt de temperatuur reeds in de 21ste eeuw en is het verlies van ijs beperkt tot minimaal 1,4 cm over 100 jaar. Het gemiddelde ijsverlies voor de verschillende klimaatmodellen voor de laagste en hoogste opwarmingsscenario's zijn respectievelijk 4,5 en 10,2 cm. Enkel bij het lage impactscenario neemt het tempo van het ijsverlies af tegen het einde van de 23ste eeuw. Een dergelijke afname zet aan tot een langdurige stabilisatie van de ijskap met een vergelijkbare geometrie als de huidige ijskap. Voor een matiger klimaatscenario loopt het gemiddelde ijsverlies op tot 5,5 cm na 100 jaar. Daarna blijft het jaarlijkse massaverlies nagenoeg constant, hoewel de opwarmingstrend al afneemt. Tegen 2300 zal het verloren ijsvolume gelijk zijn aan 20,1 cm globale zeespiegelstijging en het is onduidelijk of de Groenlandse ijskap kan blijven bestaan onder de matige, globale opwarming van 2,2°C in dit scenario.

Ondanks het feit dat de extra ijsafvoer over het laatste decennium nog de helft van de toename in het totale ijsverlies verklaart, hetgeen ook door ons model wordt gereproduceerd, zal het relatieve belang van deze component in de toekomst afnemen. Dit wordt enerzijds verklaard door de dominante rol van oppervlakteafsmelting in een warmer klimaat en anderzijds ook door een afname in ijsdikte en terugtrekking van de mariene rand van de ijskap. Deze interactie tussen processen die leiden tot een massaverlies en de manier waarop hun interne verhouding verandert met de tijd, toont aan dat huidige massaverliezen niet kunnen worden geëxtrapoleerd naar de toekomst toe om realistische prognoses te maken.